



## DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITE DE COOPERATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

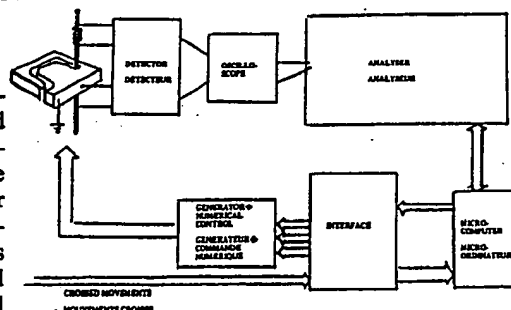
(51) Classification internationale des brevets <sup>4</sup> : <b>B23H 7/04</b>	<b>A1</b>	(11) Numéro de publication internationale: <b>WO 89/ 07503</b> (43) Date de publication internationale: <b>24 août 1989 (24.08.89)</b>
<p>(21) Numéro de la demande internationale: PCT/CH89/00026</p> <p>(22) Date de dépôt international: 15 février 1989 (15.02.89)</p> <p>(31) Numéro de la demande prioritaire: 581/88-8</p> <p>(32) Date de priorité: 17 février 1988 (17.02.88)</p> <p>(33) Pays de priorité: CH</p> <p>(71) Déposant (pour tous les Etats désignés sauf US): CHAR-MILLES TECHNOLOGIES SA [CH/CH]; 8-10, rue du Pré-de-la-Fontaine, Case postale 373, CH-1217 Meyrin 1 (CH).</p> <p>(72) Inventeur; et (75) Inventeur/Déposant (US seulement) : JENNES, Michel [BE/BE]; Daglestraat 60, B-3110 Rotselaar (BE).</p> <p>(74) Mandataire: HUGELIN, Christiane; Charmilles Technologies SA, 8-10, rue du Pré-de-la-Fontaine, Case Postale 373, CH-1217 Meyrin 1 (CH).</p>		<p>(81) Etats désignés: AT (brevet européen), BE (brevet européen), CH (brevet européen), DE (brevet européen), FR (brevet européen), GB (brevet européen), IT (brevet européen), JP, LU (brevet européen), NL (brevet européen), SE (brevet européen), US.</p> <p>Publiée Avec rapport de recherche internationale.</p>

(54) Title: EDM MACHINE WITH WIRE ELECTRODE, PROVIDED WITH CONTINUOUS-CONTROL DEVICE

(54) Titre: MACHINE EDM A DECOUPER PAR FIL AVEC DISPOSITIF DE CONTROLE EN CONTINU

## (57) Abstract

An electroerosion, cutting machine with wire electrode, comprising a numerical control for controlling an electric pulse generator and a cross-motion table as well as other machining parameters, is characterized by a device comprising: a detector for measuring the voltage and current intensity for each pulse in the interelectrode region; other characteristics which determine its profile in function of time; an analyser for continuously recording said characteristics of a train of pulses of predetermined duration and for deducing certain results from said characteristics; a microcomputer for activating and controlling said analyser, equipped with software permitting the calculation, from said results, of the value assumed by an index  $\theta$  preventing rupture of the wire electrode, the comparison of said index with a predetermined limiting value  $\theta_1$ , and the emission of a signal immediately  $\theta$  reaches  $\theta_1$ , and an interface for transmitting said signal to the numerical control of the EDM machine.



## (57) Abrégé

Machine pour découper par électroérosion avec un fil-électrode comportant une commande numérique permettant de contrôler un générateur d'impulsions électrique et une table à mouvements croisés ainsi que d'autres paramètres d'usinage, caractérisé par un dispositif comprenant: un détecteur agencé pour mesurer dans la zone interélectrode la tension et l'intensité de courant pour chaque impulsion, ainsi que d'autres caractéristiques conditionnant son profil en fonction du temps, un analyseur agencé pour enregistrer en continu ces caractéristiques pour un train d'impulsions de durée prédéterminées et en déduire certains résultats, un micro-ordinateur activant et contrôlant cet analyseur, équipé d'un logiciel permettant de calculer, à partir de ces résultats, la valeur prise par un indicateur  $\theta$  de prévention de rupture du fil-électrode, de la comparer à une valeur limite  $\theta_1$  prédéterminée, d'émettre un signal dès que  $\theta$  atteint  $\theta_1$ , et une interface transmettant ce signal à la commande numérique de la machine EDM.

**UNIQUEMENT A TITRE D'INFORMATION**

Codes utilisés pour identifier les Etats parties au PCT, sur les pages de couverture des brochures publiant des demandes internationales en vertu du PCT.

AT	Autriche	FR	France	ML	Mali
AU	Australie	GA	Gabon	MR	Mauritanie
BB	Barbade	GB	Royaume-Uni	MW	Malawi
BE	Belgique	HU	Hongrie	NL	Pays-Bas
BG	Bulgarie	IT	Italie	NO	Norvège
BJ	Bénin	JP	Japon	RO	Roumanie
BR	Brésil	KP	République populaire démocratique de Corée	SD	Soudan
CF	République Centrafricaine	KR	République de Corée	SE	Suède
CG	Congo	LI	Liechtenstein	SN	Sénégal
CH	Suisse	LK	Sri Lanka	SU	Union soviétique
CM	Cameroun	LU	Luxembourg	TD	Tchad
DE	Allemagne, République fédérale d'	MC	Monaco	TG	Togo
DK	Danemark	MG	Madagascar	US	Etats-Unis d'Amérique
FI	Finlande				

- 1 -

MACHINE EDM A DECOUPER PAR FIL AVEC  
DISPOSITIF DE CONTROLE EN CONTINU

La présente invention a trait à un dispositif permettant de contrôler, de commander en continu et d'optimiser l'usinage par électroérosion avec une machine à découper par fil-électrode.

Jusqu'à présent, toute tentative d'augmenter les performances de l'usinage EDM par fil-électrode s'est heurtée aux problèmes posés par la rupture du fil. Il s'agit d'augmenter le plus possible la vitesse de découpe tout en évitant de rompre le fil. Les principales causes de rupture sont connues : usure du fil, nombreux courts-circuits, concentration de décharges à un endroit, échauffement trop important du fil, destabilisation de l'usinage due à une découpe dans les angles. Depuis longtemps on sait comment éviter les deux premiers. On sait empêcher les concentrations de décharge grâce, par exemple, au dispositif décrit dans le brevet CH 653 585.

Mais, contrairement à l'idée répandue dans l'état de la technique, la surcharge thermique du fil n'est pas due seulement à l'énergie ou à la puissance dissipée dans le fil par certains types de décharges.

Il faut tenir compte de toutes les causes d'échauffement du fil, en particulier de la puissance dissipée par toutes les impulsions, que celles-ci provoquent ou non une décharge érosive. C'est pourquoi l'objet de la présente invention est une machine telle que celle définie dans les revendications, qui tient compte de toutes les impulsions émises.

En effet, la rupture du fil intervient en général suite à une brusque dégradation des conditions d'usinage. Pour être efficace, toute prévention devra donc faire appel au contrôle puis à l'ajustement de paramètres à temps de réponse courts. Rappelons que les dimensions et les matériaux des électrodes (pièces à usiner, fil-électrode) la composition du fluide d'usinage, certaines caractéristiques du générateur d'impulsions, ainsi que la précision et l'état de surface sont donnés au départ. Mais d'autres paramètres peuvent être modifiés en cours d'usinage, pour autant évidemment

- 2 -

que la machine EDM possède les appareillages et commandes nécessaires pour régler, par exemple, la vitesse de déroulement et la tension mécanique du fil, les caractéristiques de l'injection du fluide d'usinage et sa conductivité, la profondeur du gap ou la vitesse d'avance, et surtout certaines caractéristiques des impulsions telles leur fréquence ou leur amplitude, ou d'autres grandeurs conditionnant leur profil.

Le contrôle selon la présente invention fait de préférence appel à ces paramètres électriques, c'est-à-dire aux caractéristiques du "profil" des impulsions. Par "profil" d'impulsions on entend les courbes décrivant la variation en fonction du temps de la différence de potentiel et de l'intensité du courant dans l'espace interélectrode (encore appelé "gap").

Les paramètres utilisés, le profil des impulsions, ainsi que les divers types d'impulsions pouvant être émises, varient selon le type de générateur utilisé.

Les paramètres pouvant conditionner le profil d'une impulsion ainsi que les divers types d'impulsions sont schématisés à la figure 1. Rappelons la signification de ces divers paramètres :

$t_p$  : intervalle de temps séparant les débuts de deux impulsions de tension successives :  $t_p = t_o + t_i = t_o + t_d + t_e + t_f$ ;  
 $t_d$  : délai d'amorçage d'une décharge;  
 $t_e$  : durée de décharge;  
 $t_f$  : durée de la montée de courant en début d'étincelle;  
 $t_i$  : durée de l'impulsion de tension :  $t_i = t_d + t_e + t_f$ ;  
 $t_o$  : temps de pause séparant la fin d'une impulsion de tension du début de l'impulsion suivante;  
 $U_i$  : tension à vide;  
 $U_e$  : tension de décharge;  
 $I_e$  : intensité du courant traversant le gap en fin de décharge.

La figure 1 illustre également les cinq types d'impulsions distinguées selon l'état de la technique (Fig. 1b). Leur profil est schématisé très grossièrement, car les oscillogrammes réels de la tension  $u$  et du courant  $i$  varient d'un générateur à l'autre. Il s'agit des types suivants :

- 3 -

- circuit ouvert (symbolisé par O) :

$$t_d = t_i; \quad t_e = 0 \quad u = \text{constante} = U_i; \text{ (donc } u \text{ toujours } > U_e)$$

- décharge retardée (symbolisée par D) :

$$t_d > \text{limite } t_{dl}; \quad u \text{ peut atteindre } U_i \text{ et } U_e \\ \text{(on observe parfois } u = U_i \text{ ou } u = U_e)$$

- décharge normale (symbolisée par N) :

$$t_d < t_{dl}; \quad u \text{ peut atteindre } U_i \text{ et } U_e \\ \text{(on observe parfois } u = U_i \text{ ou } u = U_e)$$

- arc (symbolisé par A) :  $u$  peut atteindre  $U_e$  mais non  $U_i$

$$t_d = 0; \quad (t_e = 0); \quad u < U_i; \text{ on observe parfois } u = U_e$$

- court-circuit (symbolisé par S) :

$$t_d = 0; \quad (t_e = 0); \quad u \text{ ne peut atteindre } U_i \text{ et } U_e \\ \text{(on observe toujours } u < U_e)$$

En suivant et en analysant en continu les signaux de tension  $u$  et de courant  $i$ , on peut

- obtenir une image en temps réel des conditions d'usinage et réaliser en particulier un contrôle en temps réel de ce dernier.

A partir d'études off-line on peut aussi

- contrôler et optimiser l'usinage,
- calculer certaines grandeurs caractéristiques permettant d'effectuer une évaluation des conditions d'usinage,
- déterminer expérimentalement la valeur de certains coefficients, paramètres ou valeurs-limite,
- analyser le rôle joué par certains paramètres.

Ceci requiert souvent le classement des impulsions selon les divers types qui correspondent au générateur utilisé. En effet, comme mentionné ci-dessus, les types d'impulsions observés varient avec les divers types de générateur. Ainsi, pour un générateur statique émettant des impulsions de durée et de fréquence prédéterminées, on observera les cinq types définis ci-dessus. Pour un générateur à relaxation on n'observera pas de "décharges retardées". Il existe aussi des générateurs munis de dispositifs anti-arcs. Ainsi dans le cas du générateur utilisé dans l'exemple de la présente invention (Machine EDM CHARMILLES-ANDREW EF 330), pour lequel la durée d'impulsion  $t_i$  et le temps de pause  $t_o$  sont préimposés, le profil des impulsions peut être schématisé comme à la figure 1b.

- 4 -

Signalons que  $t_p = t'_i + t'_o = t_i + t_o$  est une constante.

Comme représenté à la figure 2, le détecteur du dispositif selon la présente invention permet de mesurer en continu, pour chaque impulsion, la différence de potentiel  $u$  entre l'un des contacts amenant le courant au fil-électrode et la pièce à usiner, ainsi que l'intensité  $i$  du courant avec une fréquence très élevée des mesures. Cette détection de la valeur de la tension et de l'intensité du courant peut être combinée avec celle des autres caractéristiques de l'impulsion, telles, par exemple, sa durée  $t_i$ , ou la durée  $t_e$  de la décharge.

Ces signaux sont ensuite transmis à un analyseur activé et contrôlé par un processeur, par exemple un ordinateur, un micro-ordinateur ou un micro-processeur ou tout autre organe de traitement approprié. Ils sont agencés de façon :

- à enregistrer ces signaux et à détecter les caractéristiques des impulsions,
- à classer chaque impulsion dans un type donné,
- à analyser un train d'impulsions et à calculer à partir de certains résultats des grandeurs caractéristiques permettant soit de contrôler l'usinage en temps réel, soit de réaliser des diagnostics, de mettre au point des stratégies ou d'effectuer d'autres études off-line, comme cela sera développé par la suite.

Le processeur est relié par une interface à la commande numérique de la machine EDM.

Le détecteur comporte en général un atténuateur de tension, un capteur de tension, par exemple un capteur différentiel, un capteur de courant qui peut être muni d'un amplificateur et éventuellement un appareil permettant de visualiser les signaux obtenus, tel un oscilloscope par exemple. Il effectue les mesures à une fréquence élevée, (par exemple 12,5 Mhz c'est-à-dire toutes les 0,08  $\mu$ s). En effet, il s'agit de découpage par fil-électrode; les durées  $t_i$  définies ci-dessus sont courtes (de l'ordre du dixième à quelques  $\mu$ s), tandis que  $i$  et  $u$  sont élevées ( $U_i$  est en général de l'ordre de 200 V). Les impulsions se succédant en général à quelques dizaines de  $\mu$ s et pouvant durer environ de 0,5 à 5  $\mu$ s, ceci explique les fréquences auxquelles tension

- 5 -

et courant doivent être mesurés.

On peut prévoir un dispositif atténuant le signal de tension afin de protéger, si nécessaire, le capteur correspondant. Les signaux peuvent ensuite être envoyés dans un oscilloscope avant d'être transmis à l'analyseur du dispositif selon la présente invention après avoir été, de préférence, atténués afin d'être comparés à des grandeurs de référence. Le capteur de courant est agencé pour transmettre le signal sans "bruit" de fond. Les deux signaux peuvent être visualisés, par exemple sur un oscilloscope approprié.

Avant d'être transmis à l'analyseur, les signaux obtenus à partir des mesures de courant et de tension réalisées par le détecteur peuvent être stockés sur une mémoire transitoire digitale ou analogique. Cette dernière permet de mémoriser des signaux électriques très rapides, de stocker ces informations et de les reémettre plus tard vers des appareillages de traitement ultérieur : oscilloscopes, enregistreurs, etc...

L'analyseur du dispositif selon la présente invention est agencé de façon à extraire à grande vitesse différentes caractéristiques des impulsions en comparant, pour chaque impulsion, ces signaux à des valeurs de référence afin de les évaluer. Ces opérations analytiques sont réalisées par des circuits électroniques à temps de réponse très courts, tels des séries de comparateurs réglés chacun sur un voltage ou une intensité donnée. Par exemple, une série de trois comparateurs pour détecter la valeur du signal de tension peut être réglée sur 5, 30 et 150 V et une série de deux comparateurs pour détecter la valeur du signal d'intensité de courant peut être réglée sur 5 et 10 A. Il est évidemment possible d'augmenter le nombre de ces comparateurs si on désire une meilleure précision. Chacun de ces comparateurs est relié à un récepteur différentiel indiquant si la grandeur à mesurer est inférieure ou supérieure à la valeur de réglage du comparateur.

Grâce à des circuits électroniques constitués de manière connue, l'analyseur permet aussi de déterminer, si nécessaire, (c'est-à-dire si elles ne sont pas prédéterminées par le type de générateur utilisé), les durées  $t_1$ ,  $t_d$ ,  $t_e$  et  $t_o$  définies ci-dessus.

- 6 -

Cet analyseur est aussi muni d'un logiciel permettant de comparer  $i$  avec  $I_e$  et  $u$  avec  $U_i$  et  $U_e$ , de combiner ces résultats et d'en déduire en temps réel, c'est-à-dire en quelques dizaines de  $\mu s$  le type de l'impulsion ainsi analysée, comme explicité dans l'exemple ci-après. A la fin de chaque impulsion, la mémoire doit être nettoyée, grâce à des circuits agencés afin de tenir compte des variations de la durée des impulsions.

Les résultats de ces analyses et classements sont ensuite transmis à un module comportant une mémoire et un ou plusieurs compteurs pouvant fonctionner sur des bases de temps différentes. Ils sont stockés sur ces compteurs. On obtient ainsi le nombre d'impulsions de chaque type et le nombre total d'impulsions analysées et classifiées. On prévoit de préférence plusieurs bases de temps afin de pouvoir mener simultanément une analyse détaillée pendant quelque dizaines de  $\mu s$ , par exemple, et une analyse à long terme (quelques heures, par exemple) sans interrompre cette dernière.

L'analyseur et le processeur peuvent aussi être agencés non seulement afin de classer et de totaliser le nombre d'impulsions de chaque type, mais aussi de déterminer la durées totale des décharges ( $\sum t_e$ ), la durée totale des impulsions de tension ( $\sum t_i$ ), celle des délais d'amorçage ( $\sum t_d$ ), ainsi que la valeur moyenne de ces durées. Grâce à des logiciels appropriés ils peuvent surtout une grandeur caractéristique du risque de rupture du fil, et transmettre un signal à la commande numérique dès que cette grandeur atteint un seuil donné, grâce à l'interface appropriée.

Les signaux générés par l'analyseur peuvent également être stockés et visualisés sur des dispositifs appropriés et leurs variations peuvent être enregistrées, par exemple sur un enregistreur digital.

Dans l'exemple décrit ci-dessous, le générateur est celui d'une machine EDM CHARMILLES-ANDREW EF 330. Le détecteur comporte un alternateur de tension, un capteur de tension TEKTRONIX P 6046, un capteur de courant avec amplificateur TEKTRONIX P 6302 et un oscilloscope Trio 2100.

L'analyseur permet de classer chaque impulsion dans un des cinq types définis ci-dessus selon des critères tels, par exemple, que ceux résumés dans le tableau suivant :



- 7 -

type	$i \geq I_e$ avant $t'_i$	$i \geq I_e$ après $t'_i$	$u \geq U_e$ mais $u \leq U_i$	$u \geq U_i$
circuit ouvert (O)				X
décharge retardée (D)		X		X
décharge normale (N)	X			X
arcs (A)	X		X	
courts-circuits (S)	X			

Il détecte, par exemple :

- si l'intensité atteint une limite  $I_e$  (par exemple  $I_e = 10$  A) (sinon il s'agit d'un circuit ouvert) ; si elle atteint cette limite avant ou après qu'un temps de référence  $t'_i$  se soit écoulé (dans ce dernier cas il s'agit d'une décharge retardée) ;
- si la tension atteint une limite  $U_i$  (par exemple  $U_i = 150$  V), (le courant ayant atteint  $I_e$  avant  $t'_i$ ) : il s'agit d'une décharge normale et sinon, si elle atteint une limite  $U_e$  inférieure à  $U_i$  (par exemple  $U_e = 30$  V) : il s'agit d'un arc. Si elle n'atteint pas cette limite il s'agit d'un court-circuit.

Ces opérations peuvent être simplifiées avec d'autres types de générateurs. Ainsi, si seules des impulsions de type O, N et S sont émises, il suffit de détecter si :

- l'intensité atteint ou non la limite  $I_e$  et si
- la tension atteint ou non la limite  $U_e$ , selon le tableau

	$I \geq I_e$ pendant $t_1'$	$U \leq U_e$
O	NON	OUI
N	OUI	OUI
S	OUI	NON

L'analyseur détecte également les différentes durées  $t_1$ ,  $t_o$ ,  $t_d$ ,  $t_e$  et envoie les signaux correspondant au processeur afin d'y être comptabilisées et mémorisées. Dans cet exemple :

- $t_1'$  et  $t_o$  sont fixés et mémorisés directement;
- on ne détermine et mémorise  $t_d$  que si la tension dépasse  $U = 150$  V;
- on ne détermine et mémorise  $t_e$  que si le courant dépasse  $5$  A;
- la durée  $t_1$  mesurée correspond au temps pendant lequel le courant reste supérieur à  $5$  V.

Cette analyse peut s'effectuer sur plusieurs heures de façon à faire la moyenne des très nombreux résultats obtenus. Elle peut aussi s'effectuer sur une courte période en ne prenant en compte que quelques milliers d'impulsions, afin de contrôler seulement le déroulement de l'usinage à un moment donné, ou d'activer, par exemple, un traitement détaillé et la mémorisation complète des caractéristiques d'un train d'impulsions de durée prédéterminée, dès qu'un nombre donné d'impulsions successives de même type est décelé.

Cet analyseur est activé et contrôlé par un micro-ordinateur programmé de façon adéquate, tel, par exemple, un HEWLETT PACKARD HP 85). D'autres types de micro-ordinateurs, des micro-processeurs peuvent être également utilisés.

Ces durées ainsi que la valeur de référence  $t_1'$ , sont stockées, elles aussi, sur des compteurs incorporés à cet analyseur.

Comme on l'a vu en introduction, l'ensemble analyseur-processeur peut être agencé et programmé de manière à déterminer des grandeurs caractéristiques. Ainsi, on peut programmer cet organe afin de calculer une grandeur

instantanée  $\theta$  caractéristique du risque de rupture du fil-électrode et en suivre la variation. Lorsqu'elle atteint un seuil prédéterminé, ceci est le signal de la rupture prochaine du fil. Ce signal est transmis à la commande numérique de la machine EDM qui, en réponse, ajuste au moins un paramètre d'usinage, à temps de réponse court, afin d'éviter la rupture du fil. Lorsque le calcul de  $\theta$  peut être effectué en temps réel, on réalise ainsi sur un contrôle adaptatif en temps réel (et à boucle fermée) de l'usinage, à vitesse optimale et sans rupture de fil.

Selon la présente invention, un bon indicateur de rupture  $\theta$  serait la puissance  $P$  dissipée pendant l'unité de temps  $D$  dans le fil-électrode à toutes les variétés d'impulsions. Comme grâce au dispositif de la présente invention on peut suivre la variation de  $P$  au cours de l'usinage, il a permis de réaliser une étude qui a montré que

- la rupture du fil-électrode est précédée pendant quelques ms par une brusque augmentation de la puissance  $P$  dissipée dans le gap,
- qu'une augmentation de la durée  $t$  de l'impulsion (ou du rapport  $\sum t_i / \sum t$ ) change la distribution de l'énergie et augmente aussi l'échauffement  $e$  du fil-électrode et, donc, le risque de rupture. Toutefois, rappelons que si on diminue trop  $t_i$  on est contraint d'augmenter la puissance émise par le générateur afin de conserver une vitesse de découpe satisfaisante.

On utilise de préférence un dispositif capable d'analyser simultanément les signaux de courant et de tension.

Avant d'être analysés, les signaux obtenus à partir des mesures de courant et de tension réalisées par le détecteur peuvent donc être stockés sur une mémoire transitoire. Cette dernière peut par exemple être constituée par une mémoire digitale transitoire qui permet de mémoriser des signaux électriques très rapides, de stocker ces informations et de les réémettre beaucoup plus lentement vers des appareillages à temps de réponse plus long : oscillographes, enregistreurs, etc... On peut, par exemple, utiliser un DATALAB DL 922 ayant un double canal à 8 bits et dont la fréquence de digitalisation peut atteindre 20 Mhz sur un seul canal ou 10 Mhz sur les deux. On peut utiliser d'autres installations : un enregistreur digital TEKTRONIX 791 2 AD, 500 Mhz, programmable, à un seul canal, qui visualise sur l'écran d'une diode des signaux électriques ultra-rapides,

- 10 -

éventuellement relié à un moniteur de télévision ou XYZ analogique ou encore un oscilloscope digital à mémoire TEKTRONIX 468 à deux canaux. Ces divers appareillages ne sont indiqués qu'à titre d'exemples. Tout autre dispositif ayant les mêmes fonctions, insensible aux interférences électroniques, aux "bruits" dus aux commutations à hautes fréquences, etc.. peut être utilisé.

On peut donc prévenir la rupture du fil-électrode en contrôlant automatiquement l'évolution instantanée de sa charge thermique, ceci en suivant en continu la variation de P, la puissance dissipée dans le gap, et en la maintenant inférieure à un seuil donné en ajustant au moins un paramètre d'usinage à temps de réponse court. Le dispositif de la présente invention permet comme nous le verrons ci-dessous, la détermination expérimentale de ce seuil et le contrôle adaptatif permettant d'usiner à vitesse optimale tout en prévenant la rupture du fil.

Une autre grandeur peut aussi être utilisée pour prévoir la rupture prochaine du fil : le rapport  $\sum t_e / \sum t_p$ . Signalons, toutefois, que cette grandeur est moins satisfaisante que P, sauf si on maintient  $t_1$  constante. Par contre sa détermination nécessite des calculs beaucoup moins complexes que ceux pour P, et peut être réalisée en temps réel. Cette variante peut donc être très avantageuse, car elle permet un contrôle en temps réel.

Grâce à un logiciel approprié, le micro-ordinateur activant et contrôlant l'analyseur de la présente invention permet de calculer P périodiquement en cours d'usinage, ceci, grâce à l'équation suivante :

$$P = \sum_j n_j E_j \quad (1)$$

$$\text{avec} \quad E_j = \frac{\sum_i a_i t_i(x) + b_j}{n_j} \quad (2)$$

où  $E_j$  est la moyenne des énergies d'un type donné d'impulsions j, réalisée sur  $n_j$  impulsions de ce type,

$n_j$  le nombre des impulsions de ce type par période,

$a_j$  et  $b_j$  des coefficients prédéterminés,

$t_j$  la durée d'une impulsion.

$$x = n_j$$

L'équation (1) peut s'écrire :

- 11 -

$$x = nj$$

$$P = \sum_j \left( \sum_{x=1}^{t_j(x)} a_j t_1(x) + b_j \right)$$

En effet, comme expliqué ci-dessus, l'analyse d'un train de  $\sum nj$  impulsions, permet d'obtenir par comptage des  $n_j$ . (Pour que l'indicateur  $P$  obtenu soit significatif, il faut qu'un train d'impulsions supérieur à quelques dizaines de ms soit analysé).

Grâce à une étude off-line effectuée à partir des mesures de tension  $u_j(x)$  et d'intensité  $i_j(x)$  effectuée pour chaque impulsion et de la durée  $t_{j1}(x)$  de celle-ci, il est possible

- de calculer l'énergie de cette impulsion,  $E_j(x) = \int_{t=0}^{t=t_{j1}(x)} u_j(x) \cdot i_j(x) \cdot dt$  et
- d'étudier sa variation en fonction de  $t_{j1}(x)$ .

Cette étude a montré, de façon surprenante, que pour une puissance donnée du générateur d'impulsions, l'énergie  $E_j$  ne dépend que d'un seul facteur, la durée  $t_{j1}$  des impulsions, et varie donc linéairement avec elle, mais avec des pentes différentes selon le type d'impulsions :  $E_j(x) = a_{j1} t_{j1}(x) + b_j$ . Les pentes  $a_{j1}$  et les constantes  $b_j$  sont mémorisées, et il suffit de connaître la durée et le type d'une impulsion pour calculer son énergie.

Dès que l'indicateur d'échauffement  $P$  dépasse un seuil,  $P_1$ , qui peut également être prédéterminé par une étude off-line réalisée grâce au dispositif de la présente invention, le micro-ordinateur émet une information digitale qui est convertie par une interface en signaux appropriés. Ces derniers, grâce à la commande numérique de la machine EDM, peuvent commander le générateur d'impulsion et la table à mouvements croisés, afin d'ajuster au moins un paramètre de façon à faire diminuer  $P$ , en particulier les durées  $t_{j1}$ , le temps de pause  $t_o$ , le voltage de référence  $U_s$ , l'intensité  $I_p$ . (Voir le schéma général du dispositif, figure 2)

Cette interface peut également permettre de mesurer et de calculer la vitesse moyenne de découpe  $V$ .

Dans le cas où la machine EDM est équipée d'un générateur d'impulsions à durées prédéterminées (générateur statique), il est préférable de travailler

- 12 -

selon la variante déjà signalée ci-dessus, c'est-à-dire en utilisant  $K = \frac{\sum t_e}{\sum t_p}$ , comme indicateur d'échauffement, les étapes de son calcul étant moins complexes que pour P.

On prédétermine  $t_1$  en fonction de la hauteur de la pièce à usiner, grâce à une étude off-line réalisée grâce au détecteur, à l'analyseur et au micro-ordinateur selon la présente invention (par exemple,  $t_1 = 0,0125 h + 0,875$ , h étant exprimé en mm).

On contrôle  $t_o$  et  $U_s$ , le voltage de référence grâce au même dispositif.

La simplicité du calcul de K,  $\sum t$  étant la durée de l'analyse permet, de contrôler la variation de K en temps réel. En effet,  $\sum t_p$  est la durée du train d'impulsion considérée et est fixé d'avance, donc connu. Il suffit de comptabiliser les durées des décharges.

On peut augmenter  $U_s$  et diminuer  $t_o$  afin de faire augmenter la vitesse d'usinage jusqu'à sa valeur optimum tout en surveillant l'augmentation de K qui doit rester inférieure à une limite K1. Cette limite peut également être fixée grâce à une étude off-line réalisée avec le présent dispositif. En cas de variation brusque ou de dégradation des conditions d'usinage, due par exemple à une panne ou à une découpe dans un angle, K augmente brusquement. Il suffit d'ajuster par exemple  $t_o$  et  $U_s$  afin de maintenir l'indicateur en dessous de K1. (Voir les diagrammes des figures 4, 5 et 6).

Ceci est très avantageux car il n'est plus nécessaire d'arrêter l'usinage comme préconisé dans l'état de la technique, en commandant par exemple l'arrêt de la table à mouvement croisés ou l'arrêt des impulsions de courant dans le fil dès qu'il y a risque de rupture, ou de diminuer la puissance de ces impulsions dans une mesure qui va au-delà de ce qui avait été nécessaire pour faire disparaître le risque de rupture.

En résumé, les résultats obtenus par le dispositif de la présente invention peuvent être utilisés on line (en temps réel) pour contrôler l'usinage ou off-line pour l'analyser. Le détecteur, l'analyseur ainsi que le micro-ordinateur qui active et contrôle l'analyseur peuvent être disposés à une certaine distance de la machine EDM proprement dite. Les signaux obtenus par

- 13 -

l'analyseur peuvent être visualisés, ou stockés avant de venir alimenter ultérieurement le micro-ordinateur.

Ajoutons que le dispositif selon la présente invention permet non seulement de réaliser une prévention en temps réel de la rupture du fil, ce qui permet évidemment d'usiner à vitesse optimale (en augmentant de 10 -30% la vitesse de découpe d'une machine EDM à fil-électrode lorsqu'elle est munie du dispositif selon la présente invention) ,mais aussi d'effectuer de nombreuses études permettant d'optimiser certains paramètres d'usinages, ou bien de mettre au point des stratégies d'usinages en particulier pour usiner dans les angles (voir le diagramme de la figure 7).

## REVENDEICATIONS

1. Machine pour découper par électroérosion avec un fil-électrode comportant une commande numérique permettant de contrôler un générateur d'impulsions électrique et une table à mouvements croisés ainsi que d'autres paramètres d'usinage, caractérisé par un dispositif comprenant :
  - un détecteur agencé pour mesurer dans la zone interélectrode, la tension et l'intensité de courant pour chaque impulsion,
  - ainsi que d'autres caractéristiques conditionnant son profil en fonction du temps,
  - un analyseur agencé pour enregistrer en continu ces caractéristiques pour un train d'impulsions de durée prédéterminées et en déduire certains résultats,
  - un micro-ordinateur activant et contrôlant cet analyseur, équipé d'un logiciel permettant de calculer, à partir de ces résultats, la valeur prise par un indicateur  $\theta$  de prévention de rupture du fil-électrode, de la comparer à une valeur limite  $\theta_1$  prédéterminée, d'émettre un signal dès que  $\theta$  atteint  $\theta_1$ , et
  - une interface transmettant ce signal à la commande numérique de la machine EDM.
  
2. Dispositif selon revendication 1, dans lequel le générateur émet des impulsions de fréquence ou de durée constante, et le micro-ordinateur est programmé pour calculer  $\theta$  en temps réel, cette opération de calcul comprenant une opération arithmétique consistant à déterminer  $\theta$  comme étant égal à  $\sum t_e / \sum t_p$ ,
  - $t_e$  étant la durée de chaque décharge, et
  - $t_p$  étant l'intervalle séparant le début de deux impulsions successives, pour un train d'impulsions de durée prédéterminée.



- 15 -

3. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel
- l'analyseur est équipé d'un logiciel permettant de déduire le type  $j$  de chaque impulsion d'un train d'impulsions de durée donnée, et de comptabiliser le nombre  $n_j$  des impulsions de chaque type, et
  - le micro-ordinateur est programmé pour calculer  $\theta$ , cette opération de calcul comprenant une opération arithmétique consistant à déterminer, pour ce train d'impulsions,  $\theta$  comme étant égal à  $\sum_j n_j E_j$ ,

$$\text{avec } E_j = \frac{\sum_i a_j t_i(x) + b_j}{n_j}$$

où  $E_j$  est la moyenne des énergies de type  $j$ ,  $a_j$  et  $b_j$  des coefficients prédéterminés, et  $t_i$  la durée d'une impulsion.

1/8

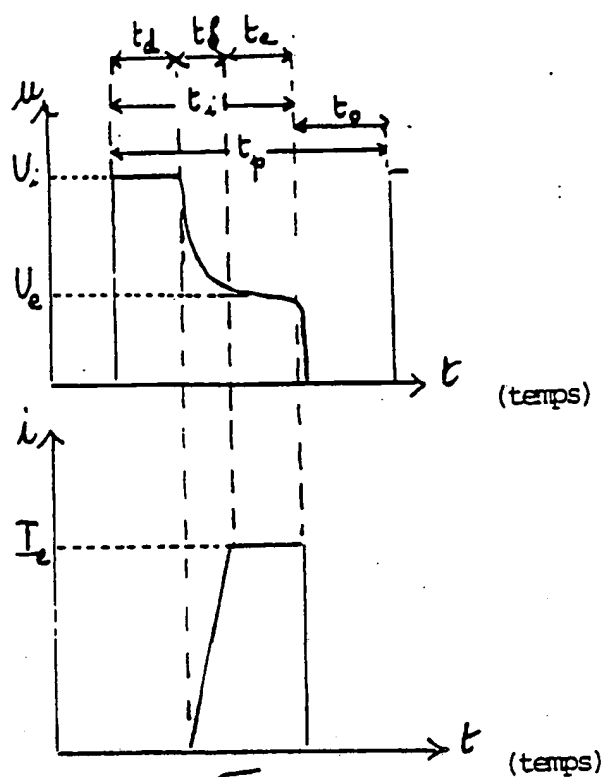


Fig. 1a

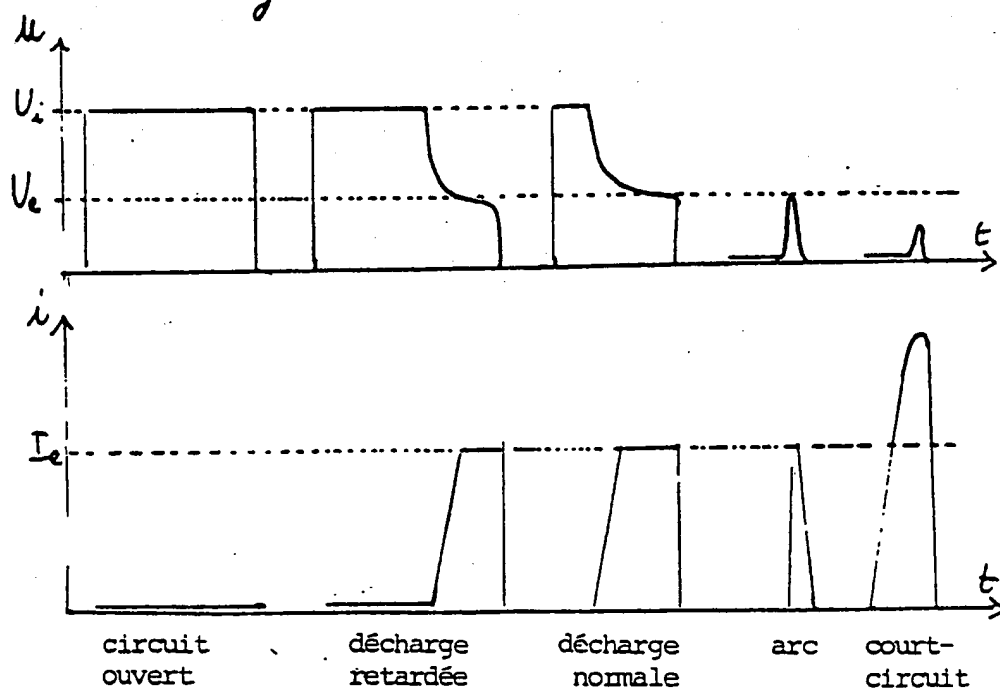


Fig. 1b

2/8

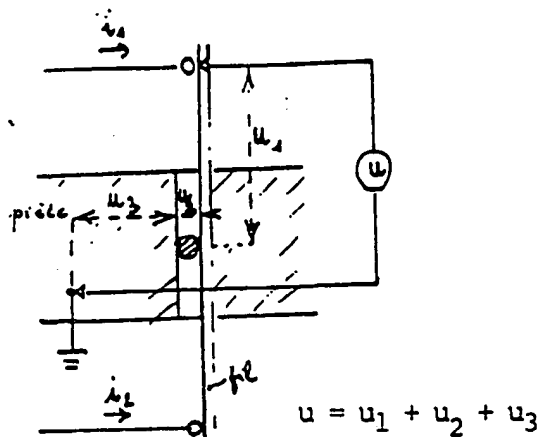


Fig. 2

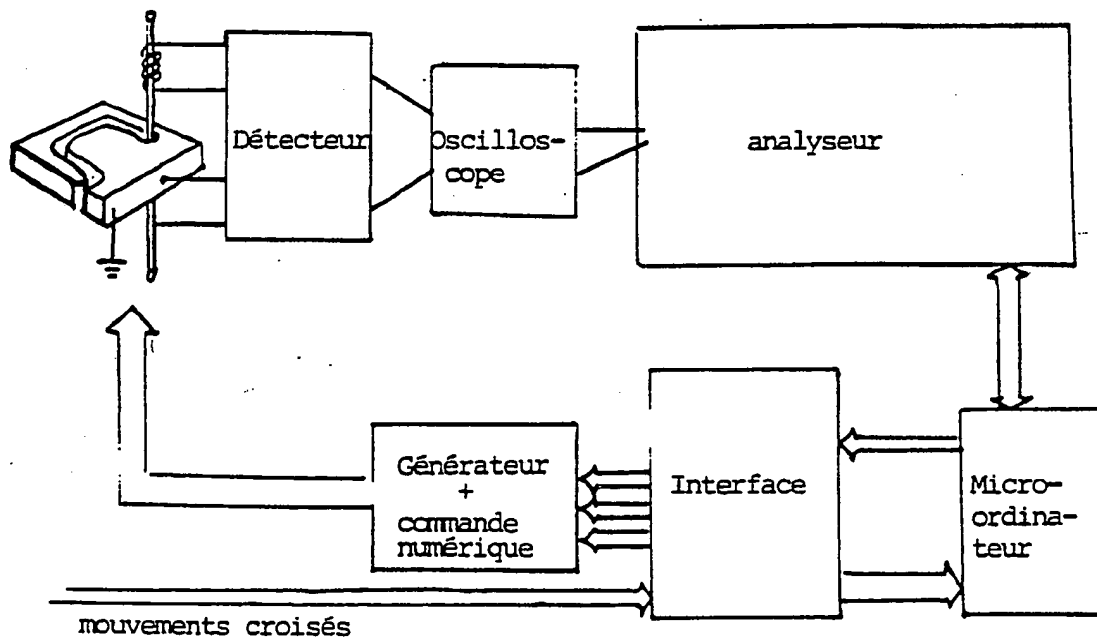


Fig. 3

3/8

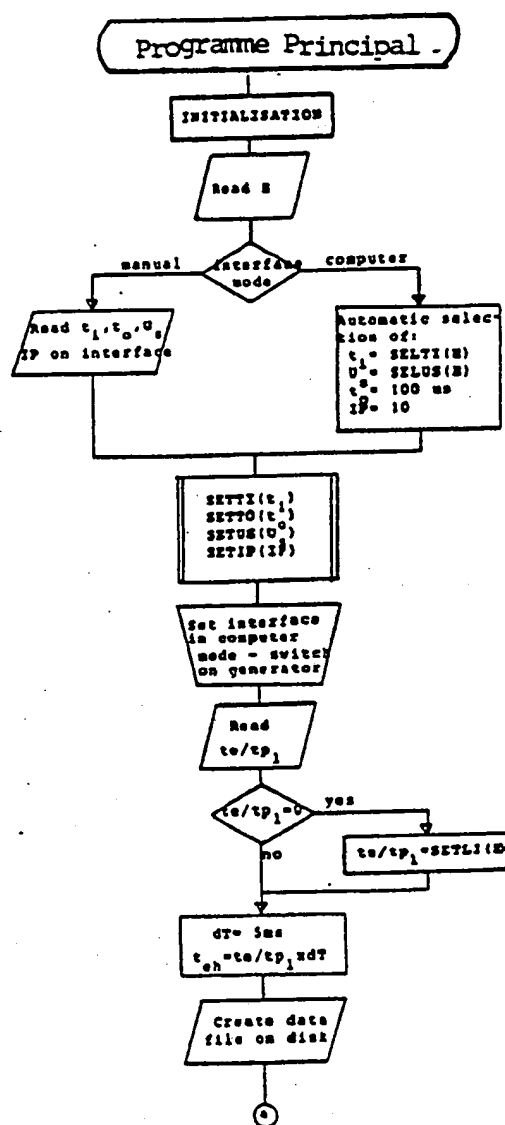
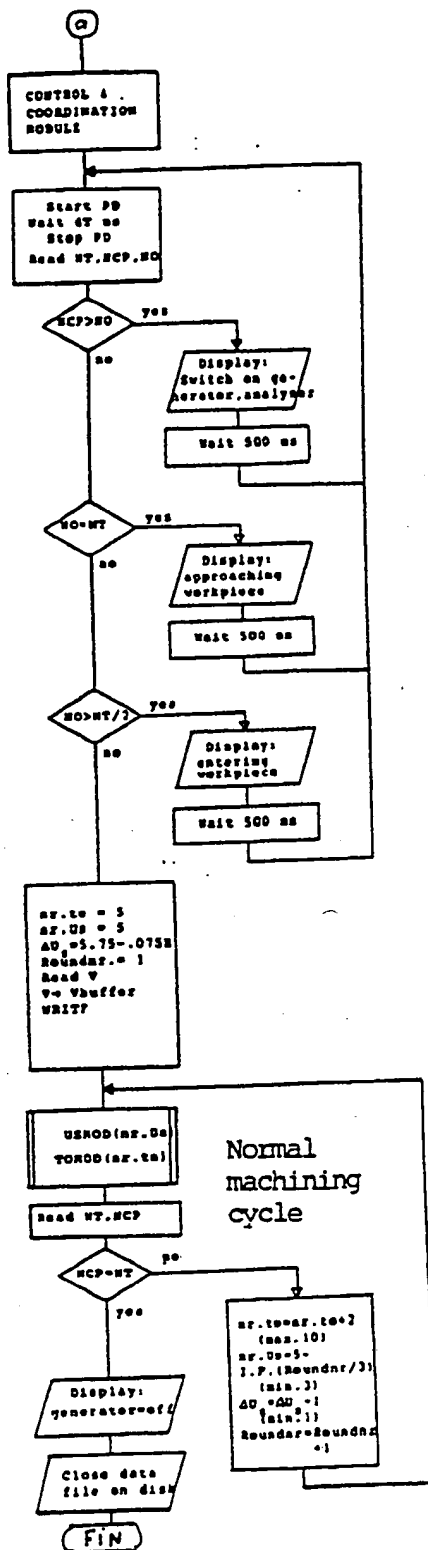


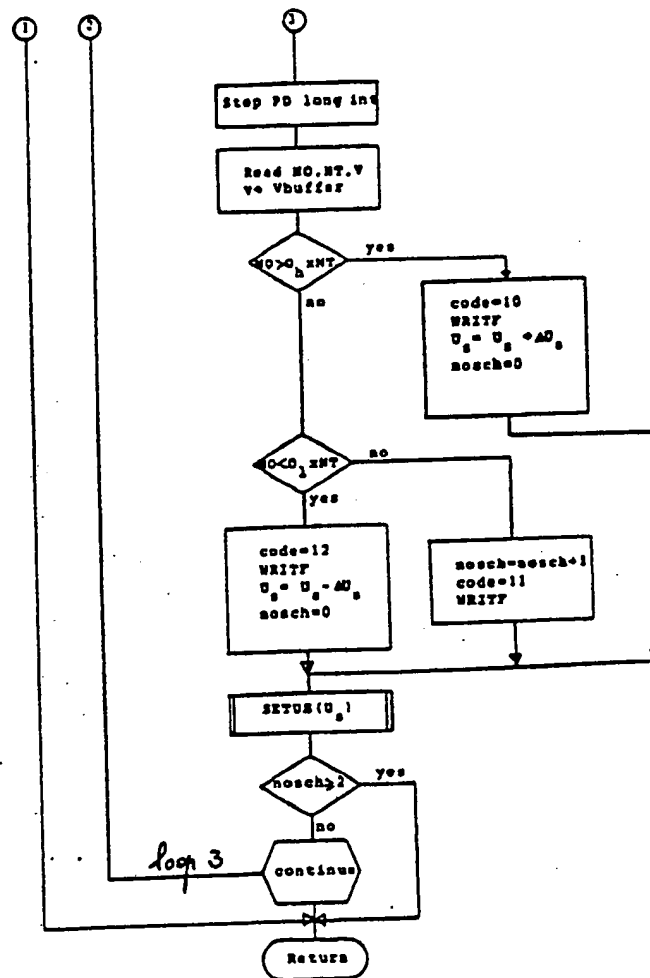
Fig. 4a

4/8

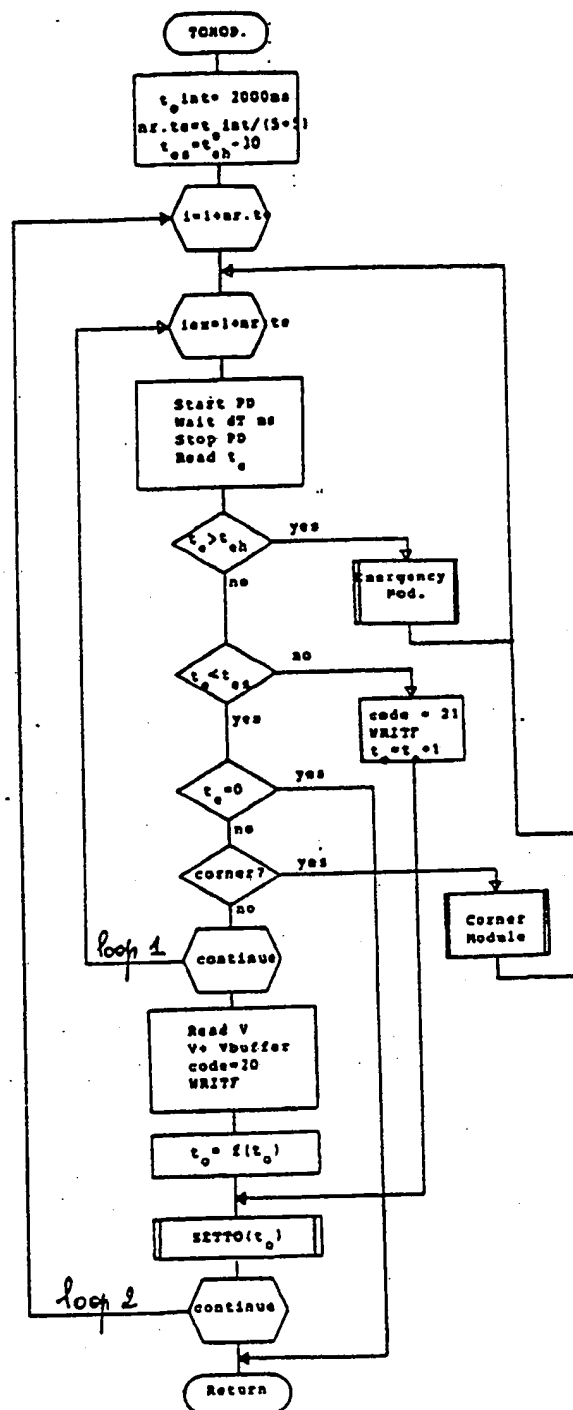




6/8

Fig 5b. Contrôle de  $U_s$

7/8

Fig. 6. Contrôle de  $t_0$



8/8

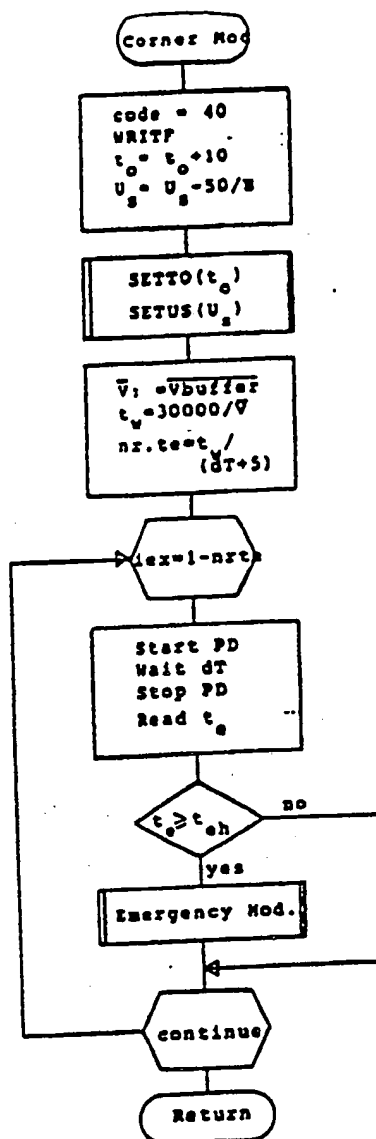


Fig. 7. Usinage dans les angles

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No PCT/CH 89/00026

<b>I. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b> (If several classification symbols apply, indicate all) * According to International Patent Classification (IPC) or to both National Classification and IPC Int. Cl. <sup>4</sup> B 23 H 7/04																	
<b>II. FIELDS SEARCHED</b> <div style="text-align: center; border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black;">Minimum Documentation Searched<sup>7</sup></div> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; border-bottom: 1px solid black;">Classification System I</td> <td style="width: 50%; border-bottom: 1px solid black;">Classification Symbols</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Int. Cl.<sup>4</sup></td> <td style="padding: 5px;">B 23 H</td> </tr> </table> <div style="text-align: center; border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black;">Documentation Searched other than Minimum Documentation to the extent that such Documents are included in the Fields Searched<sup>8</sup></div>			Classification System I	Classification Symbols	Int. Cl. <sup>4</sup>	B 23 H											
Classification System I	Classification Symbols																
Int. Cl. <sup>4</sup>	B 23 H																
<b>III. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT<sup>9</sup></b> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 10%; border-bottom: 1px solid black;">Category<sup>10</sup></th> <th style="width: 70%; border-bottom: 1px solid black;">Citation of Document,<sup>11</sup> with indication, where appropriate, of the relevant passages<sup>12</sup></th> <th style="width: 20%; border-bottom: 1px solid black;">Relevant to Claim No.<sup>13</sup></th> </tr> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: top; padding: 5px;">Y</td> <td style="padding: 5px;">Computers in Industry, vol. 1, No. 2, December 1979, North-Holland Publishing Company (NL), J.P. Kruth et al.: "Adaptive control optimization of the EDM process using minicomputers", pages 65-75, see paragraph 3.3: "Sensors"; paragraph 4.1: "Control model"</td> <td style="text-align: center; vertical-align: top; padding: 5px;">1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: top; padding: 5px;">A</td> <td style="text-align: center; vertical-align: top; padding: 5px;">---</td> <td style="text-align: center; vertical-align: top; padding: 5px;">2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: top; padding: 5px;">Y</td> <td style="padding: 5px;">CIRP Annals 1984 Manufacturing Technology, vol. 33, No. 1, 1984 (CH), M. Jennes et al.: "Comparison of various approaches to model the thermal load on the EDM-wire electrode", see pages 93-98</td> <td style="text-align: center; vertical-align: top; padding: 5px;">1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: top; padding: 5px;">A</td> <td style="text-align: center; vertical-align: top; padding: 5px;">-----</td> <td style="text-align: center; vertical-align: top; padding: 5px;">2,3</td> </tr> </table>			Category <sup>10</sup>	Citation of Document, <sup>11</sup> with indication, where appropriate, of the relevant passages <sup>12</sup>	Relevant to Claim No. <sup>13</sup>	Y	Computers in Industry, vol. 1, No. 2, December 1979, North-Holland Publishing Company (NL), J.P. Kruth et al.: "Adaptive control optimization of the EDM process using minicomputers", pages 65-75, see paragraph 3.3: "Sensors"; paragraph 4.1: "Control model"	1	A	---	2	Y	CIRP Annals 1984 Manufacturing Technology, vol. 33, No. 1, 1984 (CH), M. Jennes et al.: "Comparison of various approaches to model the thermal load on the EDM-wire electrode", see pages 93-98	1	A	-----	2,3
Category <sup>10</sup>	Citation of Document, <sup>11</sup> with indication, where appropriate, of the relevant passages <sup>12</sup>	Relevant to Claim No. <sup>13</sup>															
Y	Computers in Industry, vol. 1, No. 2, December 1979, North-Holland Publishing Company (NL), J.P. Kruth et al.: "Adaptive control optimization of the EDM process using minicomputers", pages 65-75, see paragraph 3.3: "Sensors"; paragraph 4.1: "Control model"	1															
A	---	2															
Y	CIRP Annals 1984 Manufacturing Technology, vol. 33, No. 1, 1984 (CH), M. Jennes et al.: "Comparison of various approaches to model the thermal load on the EDM-wire electrode", see pages 93-98	1															
A	-----	2,3															
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>* Special categories of cited documents:<sup>10</sup></p> <p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier document but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance: the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step</p> <p>"Y" document of particular relevance: the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.</p> <p>"&amp;" document member of the same patent family</p> </div> </div>																	
<b>IV. CERTIFICATION</b> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; border-bottom: 1px solid black;">Date of the Actual Completion of the International Search</td> <td style="width: 50%; border-bottom: 1px solid black;">Date of Mailing of this International Search Report</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">8 May 1989 (08.05.89)</td> <td style="padding: 5px;">7 June 1989 (07.06.89)</td> </tr> <tr> <td style="width: 50%; border-bottom: 1px solid black;">International Searching Authority</td> <td style="width: 50%; border-bottom: 1px solid black;">Signature of Authorized Officer</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">EUROPEAN PATENT OFFICE</td> <td></td> </tr> </table>			Date of the Actual Completion of the International Search	Date of Mailing of this International Search Report	8 May 1989 (08.05.89)	7 June 1989 (07.06.89)	International Searching Authority	Signature of Authorized Officer	EUROPEAN PATENT OFFICE								
Date of the Actual Completion of the International Search	Date of Mailing of this International Search Report																
8 May 1989 (08.05.89)	7 June 1989 (07.06.89)																
International Searching Authority	Signature of Authorized Officer																
EUROPEAN PATENT OFFICE																	

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale N° PCT/CH 89/00026

<b>I. CLASSEMENT DE L'INVENTION</b> (si plusieurs symboles de classification sont applicables, les indiquer tous) <sup>7</sup> Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB CIB <sup>4</sup> : B 23 H 7/04		
<b>II. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTÉ</b> Documentation minimale consultée <sup>8</sup>		
Système de classification	Symboles de classification	
CIB <sup>4</sup>	B 23 H	
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où de tels documents font partie des domaines sur lesquels la recherche a porté <sup>9</sup>		
<b>III. DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS</b> <sup>10</sup>		
Catégorie *	Identification des documents cités, <sup>11</sup> avec indication, si nécessaire, des passages pertinents <sup>12</sup>	N° des revendications visées <sup>13</sup>
Y	Computers in Industry, vol. 1, no. 2, décembre 1979, North-Holland Publishing Company (NL), J.P. Kruth et al.: "Adaptive control optimization of the EDM process using minicomputers", pages 65-75, voir paragraphe 3.3: "Sensors"; paragraphe 4.1: "Control model"	1
A	--	2
Y	CIRP Annals 1984 Manufacturing Technology, vol. 33, no. 1, 1984 (CH), M. Jennes et al.: "Comparison of various approaches to model the thermal load on the EDM-wire electrode", voir pages 93-98	1
A	----	2, 3
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>* Catégories spéciales de documents cités: <sup>11</sup></p> <p>« A » document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent</p> <p>« E » document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date</p> <p>« L » document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)</p> <p>« O » document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens</p> <p>« P » document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>« T » document ultérieur publié postérieurement à la date de dépôt international ou à la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention</p> <p>« X » document particulièrement pertinent: l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive</p> <p>« Y » document particulièrement pertinent: l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier.</p> <p>« &amp; » document qui fait partie de la même famille de brevets</p> </div> </div>		
<b>IV. CERTIFICATION</b>		
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale	
8 mai 1989	07 JUN 1989	
Administration chargée de la recherche internationale OFFICE EUROPEEN DES BREVETS	Signature du fonctionnaire autorisé P.C.G. VAN DER PUTTEN	